



# Maasulkuvirran laskentatyökalu

Juho Ollila

OPINNÄYTETYÖ  
Toukokuu 2020

Sähkö- ja automaatiotekniikan tutkinto-ohjelma  
Sähkövoimatekniikka

## TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Sähkö- ja automaatiotekniikka  
Sähkövoimatekniikka

OLLILA JUHO:  
Maasulkuvirran laskentatyökalu

Opinnäytetyö 29 sivua, joista liitteitä 1 sivua  
Toukokuu 2020

---

Opinnäytetyö tehtiin Sähkölandia Oy:lle. Työssä käsiteltiin maasulkuvirran syntyä sekä laskentaa. Tavoitteena oli tarkastella ensin teoriaa oppikirjojen ja aikaisempien opinnäytteiden avulla. Näiden perusteella voitiin tehdä maasulkuvirran laskentatyökalu. Laskentatyökalun tarkoitus on laskea tarvittavat arvot, jotka voidaan asettaa suojaeleeseen.

Maasulku on verkon vikatilanne, jossa yksi tai kaksi vaihetta ovat kosketuksissa maan kanssa. Tämä tapahtuu yleensä avoverkossa puun kaatuessa linjan päälle ja maakaapeliverkossa kaivinkoneen osuessa kaapeliin. Maasulkusuojauksessa käytetään suojaeleitä, jotka tarvitsevat avukseen mittamuuntajia. Virran mittauksessa käytetään yleensä kaapelivirtamuuntajia ja nollajännite mitataan kiskosta avokolmiokytkennällä.

Maasta erotetussa verkossa muuntajan tähtipiste ei ole kytkettynä maahan ja sammutetussa verkossa muuntajan tähtipiste on kelan ja mahdollisen lisävastuksen välityksellä yhteydessä maahan. Molemmille tapauksille saadaan johdettua kaavat Thevenin menetelmän avulla. Suojauksen periaatteet molemmilla verkoilla on samat, mutta erona on peruskulma, joka maasta erotetulla verkolla on  $90^\circ$  ja sammutetulla verkolla  $0^\circ$ .

Maasulun laskentatyökalussa oletus jännitetasona on 20 kV. Työkaluun valitaan haluttu määrä lähtöjä ja tämän jälkeen kaikille lähdöille valitaan pudotusvalikosta oikea kaapelityyppi. Kaapeleille annetaan pituus kilometreinä ja tämän jälkeen laskentatyökalu ilmoittaa nollajännitteen sekä maasulkuvirtojen arvot. Työssä olikin tärkeää, että työkalun käytön oppii parissa minuutissa ilman suurempaa opastusta.

Maasulun laskentatyökalu on poistettu julkisesta versiosta.

## **ABSTRACT**

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Tampere University of Applied Sciences  
Degree Programme in Electrical Engineering  
Electrical Power Engineering

OLLILA JUHO:  
Earth Fault Calculation Tool

Bachelor's thesis 29 pages, appendices 1 pages  
May 2020

---

This work was carried out for Sähkölandia Oy. The purpose of this thesis was to make a tool that can calculate earth fault current. These calculations are slow to make manually, and there is high risk for human error. The program was required to be easy to use and present information in a clear format so that the company's customers can interpret it easily.

The first part of this work contains general theory of earth fault and showcases the most common causes for earth fault in unearthed and compensated networks. Equipment needed for protection and related general theory are also discussed. The two types of networks are presented in their own sections. The unearthed network and the principle of calculating the values needed are discussed first. After this, a similar analysis of the compensated network and the calculation of values is given. Moreover, this section deals with the basics of how compensation is made.

In the final section, there is a demonstration of the calculation tool. The tool is simple to operate, as the user only needs to input two values and select the correct cable type. After that, the tool gives the required values for the protection relay to the user.

Confidential information was omitted from the public version of this thesis.

---

Key words: earth fault, compensation, protection relay, earth fault current

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO .....	6
2	MAASULKU .....	7
2.1	Maasulun muodostuminen .....	7
2.2	Maadoitusjännite ja kosketusjännite.....	8
2.3	Maasulun suojaus .....	10
3	MAASTA EROTETTU VERKKO .....	12
3.1	Teoria.....	12
3.2	Maasulkuvirran ja nollajännitteen laskenta.....	13
4	SAMMUTETTU VERKKO .....	17
4.1	Teoria.....	17
4.2	Maasulkuvirran ja nollajännitteen laskenta.....	19
5	SÄHKÖASEMAN LASKENTA .....	23
5.1	Sähköaseman tiedot .....	23
5.2	Tietojen syöttäminen maasulkuvirran laskentatyökaluun .....	23
5.3	Maasulkuvirran laskentatyökalun antamat tiedot.....	25
6	POHDINTA .....	27
	LÄHTEET .....	28
	LIITTEET .....	29
	Liite 1. Maasulkuvirran laskentatyökalu (Poistettu julkisesta versiosta) .....	29

## LYHENTEET JA TERMIT

$C$	Yhden vaiheen maakapasitanssi
$I_f$	Maasulkuvirta
$R_f$	Vikaresistanssi
$R_m$	Maadoitusresistanssi
$U_0$	Nollajännite
$U_m$	Maadoitusjännite
$U_{tp}$	Kosketusjännite

# 1 JOHDANTO

Maasulku oli Fingridin verkossa yleisin vika vuonna 2018. Tällöin Fingridin verkossa tapahtui 125 maasulkua, kun vikoja oli yhteensä 189, (Fingrid käyttöhäiriöt).

Elenia oli suorittanut säävarman verkon rakentamisesta 50% vuoden 2019 loppuun mennessä ja tämä luku nousee 75% vuoden 2028 mennessä (Elenia säävarma). Säävarma verkko tarkoittaa monesti maakaapelointia ja tämä johtaa maasulun kompensointiin. Verkon muuttuessa suojarieleet tarvitsevat uudet asetteluarvot. Käsien maasulun laskenta on hidasta ja tulosten esitysmuoto ei ole yhtenäinen. Tämän takia sähköasemien suunnittelussa maasulkusuojaukseen tarvitaan työkalu, jolla voitaisiin nopeasti laskea tarvittavat maasulkuvirrat sekä nollajännitteet suojarieleille. Siisti esitystapa sekä helppokäyttöisyys olivat tärkeimmät lähtökohdat työkalun rakentamisessa.

Tätä varten opinnäytetyössä on ensin perehdytty maasulkuun teoriapohjalta. Maasulku on vialtaan sen tyyppinen, ettei se aina riko laitteita, eikä näy käyttäjälle. Suojauksen syynä onkin useasti liian suuret kosketusjännitteet, jotka syntyvät maasulun aikana. Tämän muodostuminen on käyty teoriakappaleessa lävitse.

Maasta erotettu ja sammutettu verkko on käyty tarkemmin teorian osalta lävitse omina kappaleinaan. Näissä käydään läpi mistä maasulkuvirran, sekä nollajännitteen kaavat tulevat ja miten näiden välinen kulma näkyy suojauksessa.

Lopuksi työssä on esitetty maasulkuvirran laskentatyökalun käyttö maasta erotetulla verkolla. Esimerkkinä on käytetty sähköasemaa, jossa on kuusi 20kV lähtöä.

## 2 MAASULKU

### 2.1 Maasulun muodostuminen

Maasulussa vaihejohdin osuu maahan. Avojohtoverkossa tämä voi tapahtua esimerkiksi puun kaatuessa vaihejohtimen päälle. Toinen yleinen maasulun aiheuttaja avojohtoverkossa on salamanisku, joka muodostaa maasulun joko ylijännitesuojan tai rikkoontuneen eristimen kautta (Lakervi & Partanen 2008, 187).

Maakaapeliverkossa maasulku tapahtuu yleensä maanrakennustöiden yhteydessä, kaivinkoneen kaivaessa kaapeliin niin, että vaippa vaurioituu. Teollisuusympäristössäkin voi tapahtua maasulku. Esimerkiksi moottorikäämyksen vanhetessa tämä voi lyödä läpi moottorin runkoon. Kaapelien ylikuormitus tai mekaaninen rasite voivat myös johtaa maasulkuun. Teollisuusympäristössä maasulku ei ole niin yleinen kuin sähköjakelussa, koska yleisimpiä vian aiheuttajia ovat salamaniskut ja muut luonnonilmiöt (Fingrid merkittävät häiriöt, 5).

Maasulun tapahtuessa puun välityksellä, tämä muodostaa vikaresistanssin  $R_f$ , joka pienentää maasulkuvirtaa  $I_f$ . Maasulkuvirta on suurimmillaan, kun vaihejohdin osuu suoraan maadoitettuun osaan esimerkiksi muuntajan runkoon.

Kaksoismaasulku tapahtuu, kun kaksi eri vaihetta osuvat maahan samaan aikaan. (ABB:n TTT-käsikirja 2000. luku 8, 1). Kaksoismaasulku muodostuu yleensä seurauksena yksivaiheisesta maasulusta, kun tämä nostaa muiden vaiheiden jännitteitä maahan nähden kuvion 3 mukaisesti. Kaksoismaasulku muistuttaa yksivaiheista maasulkua silloin, kun vikaresistanssi on suuri toisessa viallisessa lähdössä. Hyvin johtavassa maaperässä kaksoismaasulku voi muodostua suuren oikosulkuvirran, kun vikaresistanssit ovat molemmilla lähdeillä pienet (Mörsky 1992, 306, 308-309).

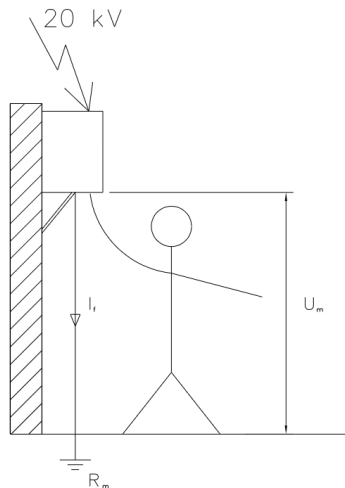
Maasulussa verkon pituus vaikuttaa maakapasitanssin suuruuteen ja täten myös maasulkuvirran suuruuteen. Mitä suurempi verkko sähköaseman on

kytketty, sitä suurempi maakapasitanssi sekä maasulkuvirta ovat.

Maakaapeleilla on huomattavan paljon suurempi ominaiskapasitanssi kuin avojohdoilla. (Lakervi & Partanen 2008, 186).

## 2.2 Maadoitusjännite ja kosketusjännite.

Maasulkuvirrasta muodostuu maasulkupaikkaan maadoitusjännite  $U_m$ . Maadoitusjännite voi muodostua, kun salamanisku aiheuttaa muuntajalla ylijännitesuojan toimimisen ja maasulkuvirta kulkeutuu ylijännitesuojan kautta muuntajan maadoituksiin ja tästä maihin (Kuvio 1) (Lakervi & partanen 2008, 187–188).



KUVIO 1. Maadoitusjännite maasulkutilanteessa. (Lakervi & Partanen 2008, 188.)

Kuvion 1 ja ohmin lain mukaisesti maadoitusjännite voidaan laskea kaavan 1 avulla, kun tiedossa on maasulkuvirta sekä maadoitusresistanssi  $R_m$ .

$$U_m = I_f \cdot R_m \quad (1)$$

Kaavasta nähdään, että maadoitusjännite kasvaa maasulkuvirran kasvaessa. Maadoitusjännitettä voidaan kuitenkin pienentää parantamalla maadoitusresistanssia. Maadoitusresistanssi koostuu maaperän



resistiivisyydestä sekä maadoituselektrodin mitoista ja asennustavoista (SFS 6001, 121).

Maadoituselektrodeja on kahta eri tyyppiä. Vaakamaadoituselektrodi, jotka asennetaan yleensä ojaan tai perustuskaivannon pohjalle. Pystyyn tai vinoon asennetut elektrodit ovat sauvaelektrodeja, jotka lyödään maan sisään. Vierekkäisten sauvojen etäisyyden täytyisi olla suurempi kuin sauvan pituus. Maadoituselektrodiin liittyvät maadoitusjohtimet on oltava mahdollisimman lyhyitä ja nämä on suojattava mekaanisilta vaurioilta. (SFS 6001 2018, 125.)

SFS 6001 (2018, 104) on määritellyt suurimmat maadoitusjännitteet laukaisuajan funktiona. (Taulukko 1). Kyseinen standardi katsoo sallittujen arvojen toteutuvan, kun toinen alla olevista ehdoista toteutuu.

Ehto C1: Kyseessä oleva asennus on osa laajaa maadoitusjärjestelmää.

Ehto C2: Mittauksiin tai laskennallisesti määritetty maadoitusjännite ei ole suurempi kuin taulukon 1 mukaisen sallitun kosketusjännitteen arvo kaksinkertaisena. (SFS 6001 2018, 91.)

TAULUKKO 1. Suurin sallittu kosketusjännite ajan funktiona. (SFS 6001 2018, 104.)

Vian kesto aika $t_f$ s	Sallittu kosketusjännite $U_{tp}$ V
0,05	716
0,1	654
0,2	537
0,5	220
1	117
2	96
5	86
10	85

Laaja maadoitusjärjestelmä määritellään niin, ettei alueella ole lainkaan tai on vain vähäisiä potentiaali eroja. Esimerkiksi sähköasema, joka syöttää kaupungin keskustaa tai muuta tiheästi rakennettua aluetta (SFS 6001 2018, 134.).

Ehdon C2 mukaisesti sallittuun kosketusjännitteeseen voidaan päästä pienentämällä vian keston aikaa. Tämän lisäksi verkkoa voidaan kompensoida, milloin maasulkuvirrat ja täten maadoitusjännite pienenevät (Lakervi & Partanen 2008, 189).

## **2.3 Maasulun suojaus**

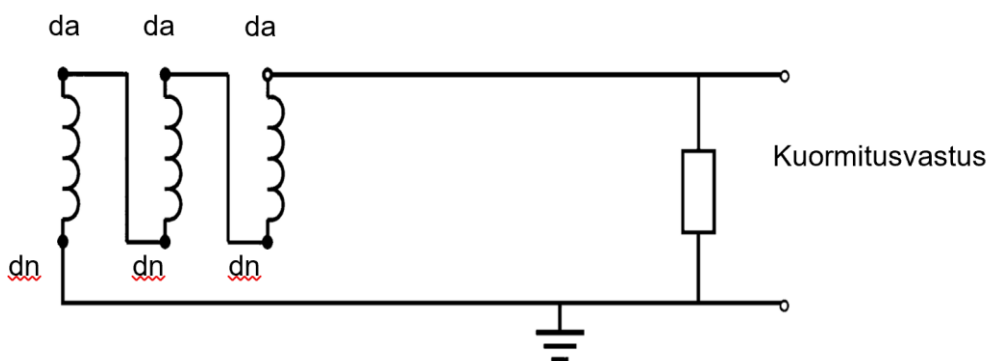
Maasulun aikana sähkönjakelu voi jatkua ilman häiriötä pitkiäkin aikoja, koska pääjännitteet eivät muutu ja maasulkuvirrat ovat yleensä alle 100 A. Kosketusjännitteet ovat syy siihen, miksi vika pitää kytkeä pois päältä. Tämän lisäksi vian jatkuessa pitkään yksivaihein maasulku voi kuitenkin muuttua kaksoismaasuluksi. (Lakervi & Partanen 2008, 189)

Sähköasemien lähdöt on varustettu suojarelleillä. Näiden ansiosta maasulun tapahtuessa viallinen lähtö voidaan kytkeä irti verkosta. Suojarele ei saa kytkeä tervettä lähtöä pois päältä. Suojareleiden täytyy kytkeä sähköaseman syöttö pois päältä, kun kiskostossa tapahtuu maasulku.

Suojareleet tarvitsevat avukseen mittamuuntajia. Jokaisella lähdöllä on oma kaapelivirtamuuntaja, joka mittaa summavirtaa. Kaapelivirtamuuntajan arvot 100/1 A, 5P10, 1 VA, kertovat ensiövirran olevan 100 A ja toisiovirran eli releeseen kytkettävät virran olevan 1 A. Tämän lisäksi 5P10 kertoo tarkkuusluokan olevan 5P sekä tarkkuusrajakertoimen olevan 10. Kaapelivirtamuuntajilla on tämän lisäksi sallittu mitoitustaakka eli suurin kuormitusimpedanssi, jolla virtamuuntaja pysyy sallitussa tarkkuusluokassa. Mitoitustaakka ilmoitetaan yleensä tehona eli tässä tapauksessa 1 VA, mikä saadaan, kun mitoitustaakka kerrotaan nimellistoisiovirran neliöllä. (ABB:N TTT-KÄSIKIRJA 2000. luku 10,1-2). Suojauksessa voidaan käyttää myös summavirtamuuntajilla, mutta on suositeltavaa käyttää kaapelivirtamuuntajia, koska nämä pystyvät mittaamaan pieniä maasulkuvirtoja. (ABB:N TTT-KÄSIKIRJA 2000 luku 8, 12)

Tämän lisäksi kiskostosta täytyy löytyä vähintään yksi jännitemuuntaja. Jännitemuuntajalla toisiokäämit jaetaan kolmeen eri osaan: mittauskäämi, suojauskäämi sekä avokolmiokäämi, jota käytetään maasulkusuojaukseen

(Kuvio 2). Avokolmiokäämiin lisätään monesti kuormitusvastus, joka estää jännitemuuntajan sekä verkon maakapasitanssin välisen resonanssipiirin. (ABB:n TTT-käsikirja 2000. luku 10, s. 6-10)



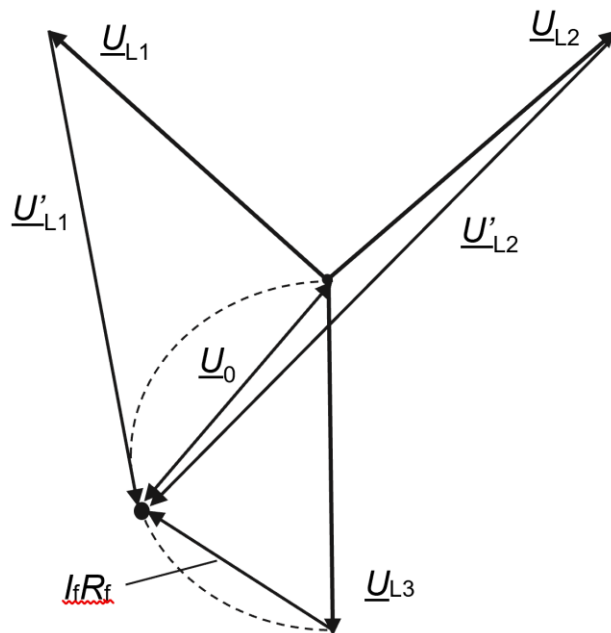
KUVIO 2. Avokolmiokytkentä. (ABB:N TTT-KÄSIKIRJA 2000. luku 10, 11)

Jännitemuuntajan arvot ilmoitetaan muodossa  $20000:\sqrt{3}/100:\sqrt{3}/100:3\text{ V}, 20\text{ VA}, \text{CI:}0,2\text{S}/3\text{P}$ . Ensimmäinen arvo ilmoittaa ensiöjännitteen ja kaksi seuraavaa arvoa toisiojännitteet mittauskäämille ja avokolmiokäämille. CI:0,2S on mittauskäämin tarkkuusluokka. 3P ilmoittaa tarkkuusluokan suojauskäämille sekä avokolmiokäämille. Luokalla 3P jännitevirhe saa olla  $\pm 3$ . Mitoitustaakka ilmoitetaan näennäistehona. (ABB:N TTT-KÄSIKIRJA 2000. luku 10, 7-9)

### 3 MAASTA EROTETTU VERKKO

#### 3.1 Teoria

Maasta erotetussa verkossa muuntajan tähtipistettä ei ole yhdistetty maahan kelan tai vastuksen kautta. Terveessä verkossa vaihejännitteiden summa on nolla. Maasulun aikana pääjännitteet eivät eroa terveen verkon pääjännitteistä. Vaiheiden ja maan välinen jännite voi maasulun aikana nousta pääjännitteen suuruiseksi kuvion 3 mukaisesti (Lakervi & Partanen 2008, 187.)

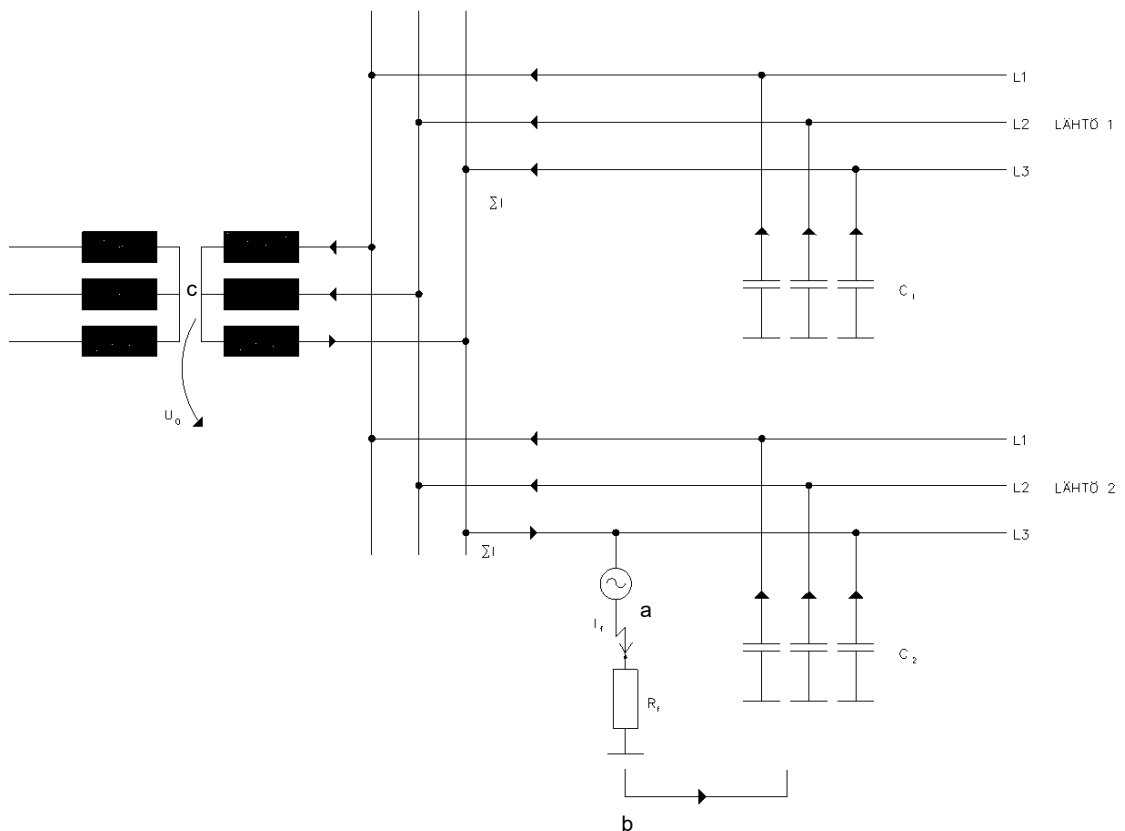


KUVIO 3. Vaihejännitteiden käyttäytyminen maasulun aikana (Lakervi & Partanen 2008, 187.)

Vikavastuksen ollessa nolla maasulun aikana, nollajännite on vaihejännitteen suuruinen. Kuviossa 3 maan potentiaali nousee  $L3$  suuruiseksi tähtipisteeseen nähden. Vikavastuksen kasvaessa nollajännite siirtyy lähemmäksi tähtipistettä ja tarpeeksi isolla vikaresistanssilla maasulku voi näyttää terveen verkon vuotovirralta (Lakervi & Partanen 2008, 186.)

Maasulun tapahtuessa maasulkuvirta kulkee vikavastuksen kautta maahan. Maakapasitanssien kautta virta kulkeutuu terveisiin vaiheisiin ja muihin

lähtöihin, tästä ne kulkeutuvat muuntajan käämien kautta takaisin vikapaikkaan kuvion 4 mukaisesti. (Lakervi & Partanen 2008, 183.)

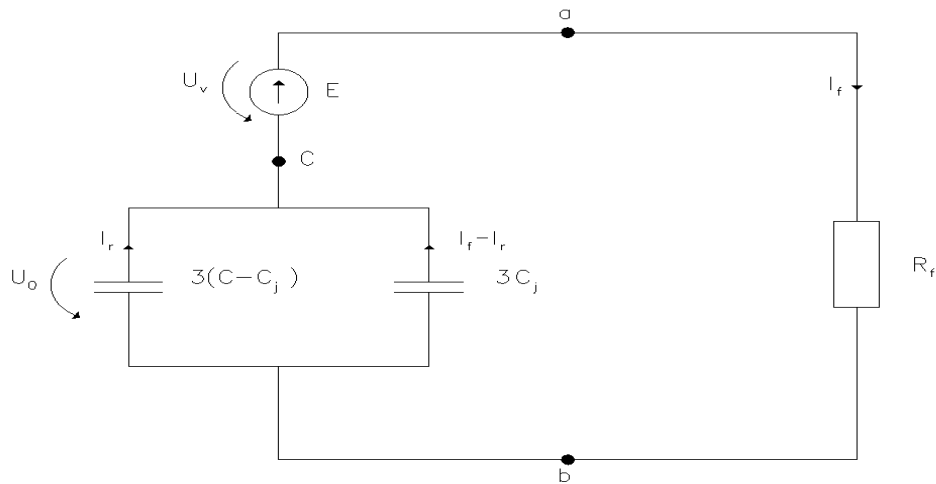


KUVIO 4. Maasulun muodostuminen maasta erotetulla verkolla. (Lakervi & Partanen 2008, 183.)

Kuviossa 4 Lähtö 2 on viallinen lähtö ja lähtö 1 on terve lähtö. Eli lähtö 1 syöttää vikavirtaa lähtöön 2. Tämän lisäksi pisteet a ja b voivat olla samassa potentiaalissa, jos vika tapahtuu ilman vikavastusta.

### 3.2 Maasulkuvirran ja nollajännitteen laskenta

Maasta erotetulle verkolle voidaan piirtää Thevenin mallin mukainen yksivaiheinen sijaiskytkentä (Kuvio 5). Pisteet a, b ja c on esitetty myös Kuviossa 4. Johtimien ja muuntajan impedanssit ovat muutaman ohmin luokkaa, kun taas vaihejohtimien kapasitanssit ovat satoja tai tuhansia ohmeja. Tämän takia ne voidaan olettaa laskennassa nollaksi.



KUVIO 5. Sijaiskytkentä maasta erotetulle verkolle. (Lakervi & Partanen 2008, 191.)

Lähdejännitteen  $E$  suuruus on ennen vikaa olleen vaihejännitteen arvo.

Mahdollinen vikavastus on  $R_f$ . Sijaiskytkennässä  $C$ , kuvaa kaikkien lähtöjen kapasitanssia, kun taas  $C_j$ , kuvaa tarkasteltavan lähdön kapasitanssia.

Sijaiskytkennästä saadaan maasulkuvirralle kaavan 2 mukainen yhtälö (Lakervi & Partanen 2008, 184-185.)

$$\underline{I_f} = \frac{j3\omega C}{1 + j3\omega C R_f} * \underline{U_v} \quad (2)$$

Kaavasta nähdään, että mitä suurempi lähtöjen muodostama kapasitanssi  $C$  on, sitä suurempi maasulkuvirta  $I_f$  on. Vaihejännitteen  $U_v$  suuruus myös nostaa maasulkuvirran arvoa, kun taas vikaresistanssin  $R_f$  kasvaessa maasulkuvirran suuruus pienenee. Suojauksen lähtökohtana on kaksi pahinta kytkentä tilannetta. Ensimmäisessä tapauksessa lähtöjä on kytkettynä ainoastaan yksi, jolloin suojaus täytyy toteuttaa nollajännitteen perusteella. Toisessa tapauksessa sähköasemalla on kaksi lähtöä kytkettynä yhtä aikaa, jolloin kaapelivirtamuuntajan mittaama maasulkuvirta on pienimmillään. Suojauksen täytyy toimia näissä molemmissa tilanteissa. (Lakervi & Partanen 2008, 197).

Kaapelivirtamuuntajan mittaama virta saadaan jakamalla maasulkuvirta lähtöjen kapasitanssien mukaan (kaava 3) (Lakervi & Partanen 2008, 195).

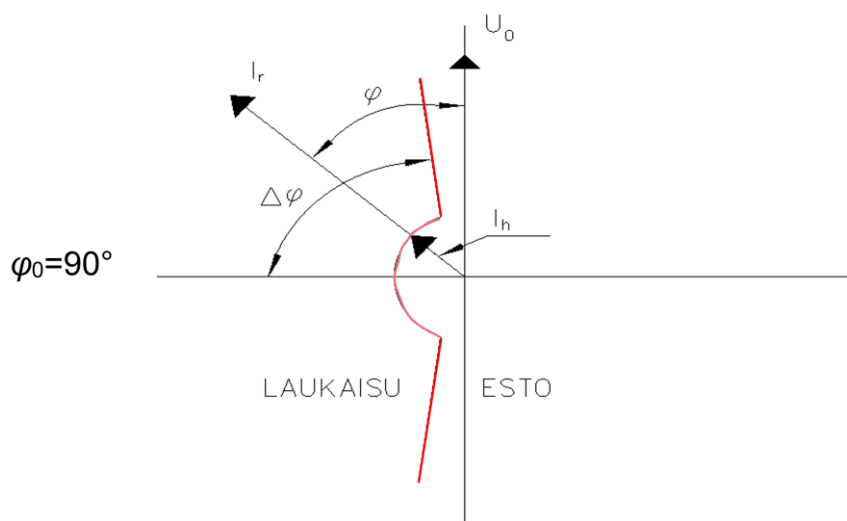
$$I_{f.oma} = \frac{C_{min}}{C_{oma} + C_{min}} \cdot I_f \quad (3)$$

Yllä olevan kaavan mukaisesti kaapelivirtamuuntaja näkee ainoastaan osan maasulkuvirrasta. Sähköasemalla ollessa ainoastaan yksi lähtö käytössä muut lähdöt eivät voi syöttää vikapaikkaan virtaa, jolloin kaapelivirtamuuntajan näkemä virta on nolla. Tämän vuoksi pitää laskea nollajännite, joka saadaan kaavalla 4 (Lakervi & Partanen 2008, 184.)

$$U_0 = \frac{U_v}{\sqrt{1 + (3 \cdot \omega \cdot C R_f)^2}} \quad (4)$$

Nollajännite pienenee maakapasitanssin kasvaessa. Suojauksen täytyy toimia, kun maasulun tapahtuu kiskostossa ja kaikki lähdöt ovat kytkettynä päälle.

Räsäsen (2016, 20-21) mukaan Lehesvuo (2016) toteaa että maasulun tapahtuessa maasulkuvirta on nollajännitettä edellä. Suorassa maasulussa virta on jännitettä edellä  $90^\circ$  ja tämä on suojauksessa peruskulma  $\varphi_0$ . Yleensä verkon suojauksessa vaihteluväli  $\Delta\varphi$  on peruskulmasta  $\pm 88$  astetta kuvion 6 mukaisesti.



KUVIO 6. Vikavirran ja nollajännitteen välinen kulma. (Lakervi & Partanen 2008, 192.)

Yllä olevassa kuviossa 6 punaisen käyrän oikealla puolella on alue, milloin suojarale ei laukaise katkaisijaa. Tällöin vikavirran  $I_h$  suuruus on liian pieni, tai nolla jännitteen ja vikavirran välinen kulma on väärän suuntainen. Punaisen käyrän vasemmalla puolella suojarale laukaisee lähdön pois.

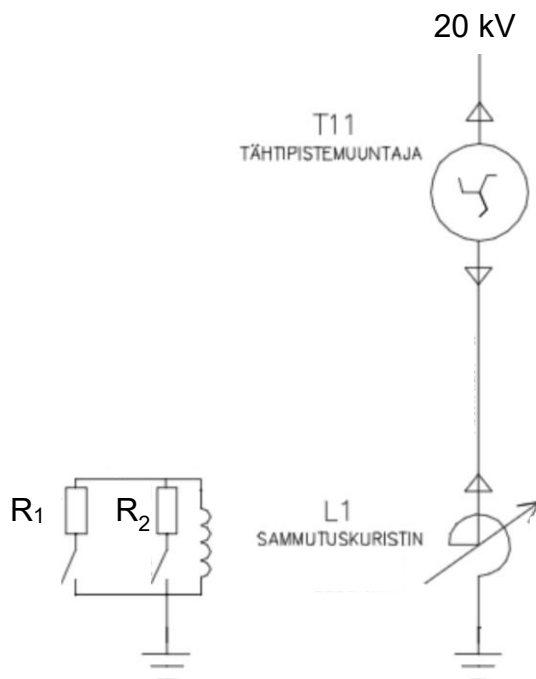


## 4 SAMMUTETTU VERKKO

### 4.1 Teoria

Viime vuosina maakaapelointi on lisääntynyt suuresti. Sähkösiirtoyhtiöt ovat tämän takia joutuneet kompensoimaan suuria maakapasitansseja lisäämällä sammutuskeloja sähköasemille. Tämän takia maasulkuvirrat ovat sammutetussa verkossa pienempiä kuin maasta erotetussa verkossa. (Lakervi & Partanen 2008, 184.)

Maasulun kompensointi voidaan suorittaa keskitetysti tai hajautetusti. Keskitetyssä kompensoinnissa kompensointikuristin sijoitetaan sähköasemalle. Kuristin kytketään verkon tähtipisteeseen, mutta koska yleensä keskijänniteverkossa ei ole muuntajan tähtipistettä käytössä, muodostetaan keinotekoinen tähtipiste muuntajan Z-kytkennällä kuvion 7 mukaisesti. (ABB:n TTT-käsikirja, luku 8, 7.)



KUVIO 7. Sammutuskuristimen kytkentä.

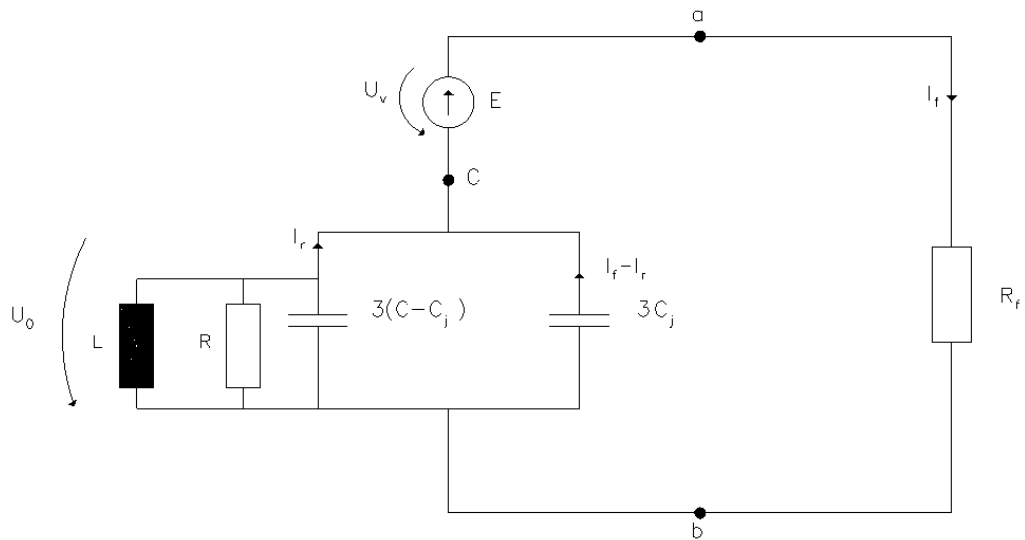
Sammutuskuristin voi olla kiinteä tai kuvion 7 mukainen säädöllä varustettu. Säädettäviä kuristimia on kahta eri tyyppiä. Jatkuvasäätöinen kuristin voi muuttaa induktanssia jännitteisenä. Tämä tapahtuu muuttamalla rautasydämen ilmaväliä. Toinen vaihtoehto on väliottokytkimellä varustettu kela (Mörsky 1992, 322.)

Kuviossa 7 tähtipistemuuntajan syöttö tulee sähköasemalla 20 kV kennosta, tästä se menee tähtipistemuuntajan  $T11$  kautta sammutuskuristimelle  $L1$ . Sammutuskuristimen rinnalle voidaan kytkeä vastukset  $R_1$  ja  $R_2$ . Vastuksien tehtävänä on tuottaa hetkellisesti pätövirtaa, jonka avulla suojarеле pystyy toteamaan vian. (Multirel, maasulkutilanne.)

Hajautetussa kompensoinnissa johtojen varsille sijoitetaan riittävä määrä kuristimia. Yksittäiset johtolähdöt jäävät tällä tyylillä alikompensoiduiksi. (ABB:n TTT-käsikirja 2000, Luku 8, 7.)

Sammutetussa verkossa maasulun tapahtuessa virrat kulkevat terveiden vaiheiden kautta vikapaikkaa kohti. Erona maasta erotettuun verkkoon maasulkuvirrat kulkevat muuntajan nollapisteeseen myös maadoituskelan ja mahdollisen kelan rinnalla olevan vastuksen kautta kuvion 8 mukaisesti (Lakervi & Partanen 2008 185.)





KUVIO 9. Kompensoidun verkon sijaiskytkentä. (Lakervi ja Partanen 2008, 185.)

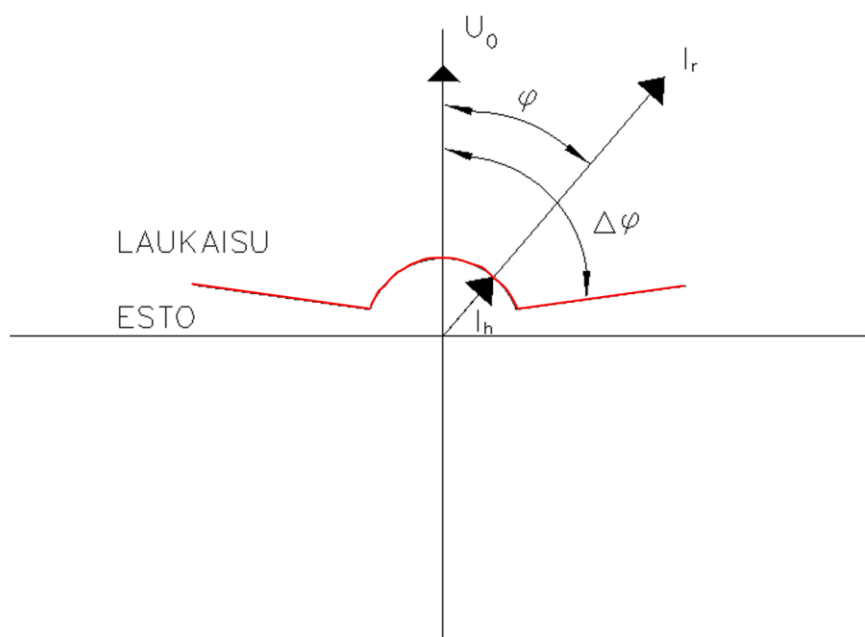
Sijaiskytkentä on melkein samanlainen kuin maasta erotetussa verkossa, mutta kapasitanssien rinnalle on tullut kela  $L$  sekä kelan rinnalle kytkettävä lisävastus  $R$ . Lisävastuksen tehtävänä on lisätä maasulun pätökomponenttia ja täten helpottaa vian paikantamista. Kuviosta 9 johdetaan kaava 5, jolla saadaan laskettua kompensoidun verkon maasulkuvirta (Lakervi ja Partanen 2008, 185.)

$$\underline{I_f} = \frac{\underline{U_v}}{R_f + \frac{R}{1 + jR\left(3\omega C - \frac{1}{\omega L}\right)}} \quad (5)$$

Täysin kompensoidussa verkossa maadoituskela kumoaa johtimien kapasitanssin ja maasukuvirran lauseke muuttuu kaavan 6 mukaiseksi. (ABB:n TTT-käsikirja 2000, 8)

$$\underline{I_f} = \frac{\underline{U_v}}{R_f + R} \quad (6)$$

Täysin kompensoidun verkon lausekkeesta nähdään, ettei maasulkuvirran ja nollajännitteen välillä ole vaihesiirtoa. Räsänen (2016, 20-21) mukaan Lehesvuo (2016) toteaa suojauksen peruskulman olevan 0 astetta ja vaihteluvälin olevan  $\pm 88$  astetta. Suojaus toteutetaan kuvion 10 mukaisesti, niin että laukaisu tapahtuu punaisen viivan yläpuolella.



KUVIO 10. Maasulkuvirran sekä nollajännitteen välinen kulma. (Lakervi ja Partanen 2008, 192.)

Suojauksen ehdot ovat samat kuin maasta erotetulla verkolla. Laukaisu toteutetaan suurella kulmalla, koska kompensointi voi joissain tilanteissa olla suurempi kuin lähtöjen tuottama kapasitanssi. Tämä voi tapahtua esimerkiksi silloin kun sähköasemalla on kiinteä kompensointi ja kaikki lähdöt eivät ole käytössä. Maasulkuvirta voi taas jäädä kapasitiiviseksi, jos verkon kompensointi on alimitoitettu.

Kompensoidussakin verkossa täytyy suojata kiskossa tapahtuva maasulkunollajännitteen avulla. Tämä voidaan laskea kaavalla 7 (Lakervi & Partanen 2008, 186.)

$$\underline{U_0} = \frac{-R}{R_f + R + jRR_f \cdot \left(3\omega C \frac{1}{\omega L}\right)} \cdot \underline{U_v} \quad (7)$$

Täysin kompensoidussa verkossa lauseke sievenee kaavan 8 mukaiseksi. (ABB:n TTT-käsikirja, Luku 8, 9)

$$\underline{U_0} = \frac{R}{R_f + R} \cdot \underline{U_v} \quad (8)$$

Kompensoidussa verkossa viallisen johtolähdön summavirtaan vaikuttaa johdon oma maakapasitanssi ja vuotohäviöresistanssin kautta kulkeva osa maasulkuvirrasta. Tässä työssä ei ole tehty tarkastelua, miten maasulkuvirta jakaantuu lähtöjen kesken kompensoidussa verkossa.

## 5 SÄHKÖASEMAN LASKENTA

### 5.1 Sähköaseman tiedot

Esimerkki sähköasemalla 20 kV lähtöjä on 6 kpl. Lähtöihin kytketyt johdot ja kaapelit on esitetty taulukossa 2.

TAULUKKO 2. Lähtöjen 1-6 kaapelien/johtojen tiedot.

Lähtö	Kaapelin/johdon tyyppi	Kaapelin/johdon pituus (km)
1	Avojohto	50
2	Avojohto	30
3	Avojohto	24
4	AHXAMK-W 185mm	10
5	AHXAMK-W 120mm	13
6	AHXAMK-W 120mm	7

Sähköasemalla on yhteensä 10 kappaletta 20 kV kennoja, näistä ainoastaan kuuteen on kytkettynä kaapelit, jotka vaikuttavat maasulkuvirran suuruuteen. Tämän lisäksi kennoihin on kytkettynä omakäyttömuuntaja, syöttö, mittaus ja kompensointi. Omakäyttömuuntaja tuottaa sähköasemalle tarvittavan sähkön valaistukselle ja lämmitykselle, mutta ei vaikuta suojaukseen. Syöttökenno on toisesta päästä kytkettynä sähköasemaa syöttävään muuntajaan ja toisesta päästä kiskostoon. Kun kiskostossa tapahtuu maasulku, niin syöttökenno täytyy kytkeä pois päältä. Mittauskennossa on jännitemuuntaja ja tämän avokolmiokytkennästä mitataan nollajännite. Kompensointi on toteutettu kuvion 7 mukaisesti. Kun kompensointi ei ole kytkettynä vastaa tilanne maasta erotettua verkkoa.

### 5.2 Tietojen syöttäminen maasulkuvirran laskentatyökaluun

Kun lähtöjen lukumäärä on tiedossa, tarvitsee tämä luku syöttää maasulkuvirran laskentatyökaluun. Kuvion 11 yläosassa on esitetty laskentatyökalun lähtötilanne, kun lähtöjen määrä on 0. Tässä tapauksessa esimerkki

sähköasemassa on 6 lähtöä, joten syötetään työkaluun luku 6, kuten on tehty kuvion 11 alemmassa osassa.

MAASTA EROTETTU VERKKO							
Lähtöjen lkm.max 14	0						
Kaapelin 1 tyyppi							
Kaapelin 1 pituus (km)							
Kaapelin 2 tyyppi							
Kaapelin 2 pituus (km)							
Kaapelin 3 tyyppi							
Kaapelin 3 pituus (km)							

MAASTA EROTETTU VERKKO							
Lähtöjen lkm.max 14	6	Lähtö 1	Lähtö 2	Lähtö 3	Lähtö 4	Lähtö 5	Lähtö 6
Kaapelin 1 tyyppi							
Kaapelin 1 pituus (km)							
Kaapelin 2 tyyppi							
Kaapelin 2 pituus (km)							
Kaapelin 3 tyyppi							
Kaapelin 3 pituus (km)							

KUVIO 11. Lähtöjen määrän valinta.

Kun lähtöjen määräksi valitaan 6, tämä tuo esille yhteensä kuusi lähtöä. Kennojen nimeäminen on sähköasemakohtaista, jonka takia työkalu antaa lähdöille arvon "Lähtö 1, Lähtö 2...."

Työkalun jännitetasoa voi muuttaa, mutta oletuksena tämä on 20 kV. Työkalun vikaresistanssiksi on asetettu 500  $\Omega$ , jota voi tarvittaessa muuttaa. (Kuvio 12)

Pääjännite (kV)	20		
Vikaresistanssi (ohm)	500		
Sammutuskuristin (H)			
Lisävastus (ohm)			

MAASTA EROTETTU VERKKO			
Lähtöjen lkm.max 14	6	Lähtö 1	Lähtö 2
Kaapelin 1 tyyppi		Avojohto	Avojohto
Kaapelin 1 pituus (km)		50	30

KUVIO 12. Pääjännitteen sekä vikaresistanssin arvot.

Työkaluun on asetettu eri kaapelityyppejä sekä näiden maakapasitanssien arvot kilometriä kohden. Ennalta eri kaapelityyppejä on määritetty 9.Yhteensä eri kaapelityyppejä voi olla 20. Näistä kaapeleista on luotu pudotusvalikko Excelin **dadatyökalulla** (Kuvio 13)



MAASTA EROTETTU VERKKO							
Lähtöjen lkm.max 14	6	Lähtö 1	Lähtö 2	Lähtö 3	Lähtö 4	Lähtö 5	Lähtö 6
Kaapelin 1 tyyppi		Avojohto	Avojohto	Avojohto	AHXAMK-W 185mm	AHXAMK-W 120mm	AHXAMK-W 120mm
Kaapelin 1 pituus (km)			30	24	10	13	7
Kaapelin 2 tyyppi		AHXAMK-W 70mm					
Kaapelin 2 pituus (km)		AHXAMK-W 95mm					
Kaapelin 3 tyyppi		AHXAMK-W 120mm					
Kaapelin 3 pituus (km)		AHXAMK-W 150mm					
Maakapasitanssi (nF)		AHXAMK-W 185mm					
Pahimman tilanteen kapasitanssi (F)		AHXAMK-W 240mm					
		AHXAMK-W 300m	180	144	3000	3900	2100
$I_{g}$ (A)		0,00000044	0,00000032	0,00000029	0,00000314	0,00000404	0,00000224
$I_{oma}$ (A)		4,73	3,49	3,11	19,14	20,45	16,78
$I_{min}$ (A)		1,53	1,55	1,55	0,88	0,73	1,08
		3,20	1,94	1,55	18,27	19,72	15,70

KUVIO 13. Kaapelin tyyppin ja pituuden valinta

Kaapelin valittua Excel laskee tarvittavat tiedot automaattisesti. Laskentatyökaluun voi samaan lähtöön valita kolmea eri kaapelityyppiä, joiden summa muodostaa maakapasitanssin kyseiselle lähdölle. Kolmeen eri kaapelityyppiin päädyttiin sen takia että tällöin esitysmuoto pysyy siistinä.

### 5.3 Maasulkuvirran laskentatyökalun antamat tiedot

Työkalulla on laskettu esimerkki sähköaseman maasulkuvirrat ja jännite (Kuvio 14). Pääjännitteen suuruus on 20 kV ja vikaresistanssi on 500 ohm.

MAASTA EROTETTU VERKKO							
Lähtöjen lkm.max 14	6	Lähtö 1	Lähtö 2	Lähtö 3	Lähtö 4	Lähtö 5	Lähtö 6
Kaapelin 1 tyyppi		Avojohto	Avojohto	Avojohto	AHXAMK-W 185mm	AHXAMK-W 120mm	AHXAMK-W 120mm
Kaapelin 1 pituus (km)		50	30	24	10	13	7
Kaapelin 2 tyyppi							
Kaapelin 2 pituus (km)							
Kaapelin 3 tyyppi							
Kaapelin 3 pituus (km)							
Maakapasitanssi (nF)		300	180	144	3000	3900	2100
Pahimman tilanteen kapasitanssi (F)		0,00000044	0,00000032	0,00000029	0,00000314	0,00000404	0,00000224
$I_{g}$ (A)		4,73	3,49	3,11	19,14	20,45	16,78
$I_{oma}$ (A)		1,53	1,55	1,55	0,88	0,73	1,08
$I_{min}$ (A)		3,20	1,94	1,55	18,27	19,72	15,70
$U_0$ (kV)	2,49						
	22 %						
$I_{efmax}$ (A)	22,64						

KUVIO 14. Maasulkuvirran laskentatyökalun antamat tiedot

**Muuta-funktio** vertaa valittua kaapelityyppiä ennalta määriteltyihin kaapeleihin ja kertoo tämän maakapasitanssin kilometriä kohden syötetyllä pituudella. Kaikille lähdöille lasketaan oma maakapasitanssi.

Pahin tilanne suojauksen kannalta tapahtuu, kun oman lähdön kanssa on käytössä ainoastaan pienimmän maakapasitanssin omaava lähtö. Excelin **Min** toiminnolla etsitään pienin maakapasitanssi, joka summataan yhteen oman lähdön maakapasitanssiin. Työkalussa pitää itse osata katsoa lähtö, jossa on pienin maakapasitanssi ja jättää tämän arvot huomioimatta.

Pahimman tilanteen kapasitanssin laskettua täytyy laskea maasulkuvirran arvo. Tämä saadaan kaavalla 9. (ABB:n TTT-käsikirja 2000, 2.)

$$I_f = \frac{\sqrt{3}\omega C}{\sqrt{1 + (3\omega C R_f)^2}} * U \quad (9)$$

Yllä olevalla kaavalla saadaan maasulkuvirran  $I_f$  arvo, kun kaavassa  $C$ :n paikalla on työkalun laskema pahimman tilanteen kapasitanssi. Vikavastus  $R_f$  ja pääjännite  $U$  on asetettu laskentatyökaluun tietoja antaessa.

Maasta erotetussa verkossa työkalu ilmoittaa viallisen lähdön summavirtamuuntajien näkemän virran  $I_{oma}$ . Tämän laskentaan käytetään kaavaa 3. Nollajännitteen suuruus ilmoitetaan kilovoltteina ja lasketaan kaavalla 10 (ABB:n TTT-käsikirja 2000, 5). Tätä verrataan vaihejännitteen suuruuteen, joka kertoo erotuksen prosentteina.

$$U_0 = \frac{1}{\sqrt{1 + (3\omega C R_f)^2}} * U_v \quad (10)$$

Nollajännite  $U_0$  on pienimmillään, kun kaikki lähdöt ovat kytkettynä saman aikaisesti. Tämän takia kapasitanssin  $C$  arvo kaavassa 10 on summa kaikkien lähtöjen omista maakapasitansseista.

Työkalusta löytyy kohta, joka kertoo maasulkuvirran maksimi arvon. Kaavan 1 mukaisesti maadoitusjännite on suurimmillaan, kun maasulkuvirta on suurimmillaan. Maadoitusjännitettä ei lasketa, koska tähän vaikuttaa maadoitusresistanssi, joka täytyy laskea erikseen.

## 6 POHDINTA

Opinnäytteen tavoitteena oli tehdä laskentatyökalu millä pystyy laskemaan maasulkuvirran sekä nollajännitteen. Työkalun täytyi olla helppokäyttöinen ja esitysmuodon siisti.

Työssä teoriapohjana on käytetty kirjallisuudesta löytyviä laskukaavoja. Työtä varten kaavat on tarkistettu useasta muusta opinnäytetyöstä, jotka kaikki viittaavat samoihin lähteisiin eli Lakervin & Partanen. Myös ABB:n TTT-käsikirjan kaavoja on käytetty työssä.

Esitysmuotona Excelillä tehty laskentatyökalu on siisti ja sen käyttö on helppoa. Laskentatyökalua tulee jatkossa kehittää niin että se pystyy automaattisesti laskemaan kompensoidun verkon lähtöjen omat maasulkuvirrat.

## LÄHTEET

ABB:n TTT-käsikirja 2000-07 Luku 8 maasulkusuojaus. Luettu 3.5.2020  
[http://www.oamk.fi/~kurki/automaatiolabrat/TTT/08\\_0\\_Maasulkusuojaus.pdf](http://www.oamk.fi/~kurki/automaatiolabrat/TTT/08_0_Maasulkusuojaus.pdf)

ABB:n TTT-käsikirja 2000-07 Luku 10 mittaus-, ohjaus- ja suojauslaitteistot. Luettu 3.5.2020 [http://www.oamk.fi/~kurki/automaatiolabrat/TTT/10\\_1\\_Mittaus-%20ohjaus-%20ja%20suojalaitteet.pdf](http://www.oamk.fi/~kurki/automaatiolabrat/TTT/10_1_Mittaus-%20ohjaus-%20ja%20suojalaitteet.pdf)

Areva, N. 2010. Maasulkuvian paikannus kompensoidussa keskijänniteverkossa. Sähkötekniikan koulutusohjelma. Metropolia. Insinöörityö.

Elenia säävarma. Luettu 4.5.2020 <https://www.elenia.fi/sahko/saavarma>

Fingrid käyttöhäiriöt vuonna 2018 ajan mukaisessa järjestyksessä. Luettu 3.5.2020. [https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/kantaverkko/suomen-sahkojarjestelma/fg-hairiot-2018\\_fi\\_kotisivuille-13.9.2019.pdf](https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/kantaverkko/suomen-sahkojarjestelma/fg-hairiot-2018_fi_kotisivuille-13.9.2019.pdf)

Fingrid merkittävät häiriöt vuonna 2018. Luettu 3.5.2020. <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/yhtio/toimikunnat/kayttotoimikunta---merkittavat-hairiot-2018.pdf>

Lakervi, E. & Partanen, J. 2008. Sähkönjakelutekniikka. Helsinki: Otatieto

Multirel maasulkutilanne ja kompensoinnin tarkoitus. Luettu 31.5.2020  
<https://multirel.fi/kompensointi-ja-maasulkureleet/maasulkuvirran-kompensointi/maasulkutilanne-ja-kompensoinnin-tarkoitus/>

Mörsky, J. 1992. Relesuojaustekniikka. Espoo: Otatieto

Räsänen, O. 2016. Keskijänniteverkon maasulkusuojauksen toteuttaminen johdonsuojareleellä. Sähkötekniikan koulutusohjelma. Savonia ammattikorkeakoulu. Opinnäytetyö.

SFS 6001:2018. Suurjännitesähköasennukset. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto SFS.

## **LIITTEET**

Liite 1. Maasulkuvirran laskentatyökalu (Poistettu julkisesta versiosta)